

aux produits chimiques est souvent négligée. Aussi sait-on très peu de choses en termes de sécurité chimique des bioplastiques, c'est-à-dire sur l'identité des composés présents dans le matériau et leur toxicité, ainsi que sur l'exposition humaine à ces composés. Ces lacunes sont problématiques, car l'exposition humaine aux substances provenant des bioplastiques et des matériaux d'origine végétale va augmenter avec leur utilisation croissante.

Enfin, comme les plastiques classiques, les plastiques biosourcés ou dits « biodégradables » peuvent contenir des monomères non polymérisés, des additifs et des Nias. Pire, les additifs sont même particulièrement importants pour les polymères extraits de ressources naturelles, comme l'amidon et la cellulose type boîte d'œufs, ou de microorganismes, comme le PLA, car leurs propriétés physiques – résistance thermique, propriétés de barrière... – sont limitées. Et comme la plupart de ces composés ne sont pas liés de manière covalente au polymère, ils peuvent aussi être transférés dans l'air, les solides et les liquides.

En 2020, une équipe autour de Martin Wagner, de l'université norvégienne de Sciences et de Technologie, a évalué la toxicité d'une vingtaine de bioplastiques (dont certains à base de bambou ou de cellulose) selon une méthodologie similaire à celle qu'elle avait utilisée un an plus tôt pour les plastiques

classiques. Après avoir découpé une partie des contenants alimentaires en bioplastique, les chercheurs en ont extrait le maximum de composés à l'aide de solvants, puis ont évalué par spectrométrie de masse le nombre de molécules transférées du plastique vers le solvant. Ils ont ensuite analysé sur des cellules leur toxicité et leurs effets hormonaux.

Ils ont ainsi montré que des milliers de substances (connues et non connues) composaient ces bioplastiques et que les trois quarts de ces bioplastiques étaient toxiques ou perturbaient les gènes impliqués dans la réponse aux hormones (leur étude sur les plastiques conventionnels avait montré des résultats similaires). Cette étude offre donc l'avantage de montrer que la plupart des bioplastiques sont à considérer comme des plastiques classiques, mais le fait d'avoir utilisé des solvants est discutable, car d'un usage peu réaliste. Mais de nouvelles approches devraient bientôt permettre d'évaluer les effets biologiques de molécules migrant réellement dans les aliments (voir l'encadré page 58).

Ainsi, comme les plastiques, la plupart des bioplastiques sont une source majeure d'exposition humaine à de multiples composés entrant dans leur fabrication. Et les écosystèmes terrestres et aquatiques ne sont pas mieux préservés



TRIBUNES DU MUSÉUM

JEAN-BAPTISTE FINI interviendra le samedi 3 juillet après-midi lors de la Tribune **Plastiques : l'overdose ?** du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Événement gratuit, informations sur mnhn.fr/tribunes-plastiques

MICROPLASTIQUES, NANOPLASTIQUES ET SANTÉ

Omniprésents dans l'environnement, les microplastiques et nanoplastiques proviennent principalement de la dégradation des plastiques à usage unique, des engins de pêche, des vêtements et des cosmétiques, des peintures, des pneus et de la poussière urbaine. En raison de leur faible densité, une part importante se retrouve dans les rivières et la mer. Leur présence dans la nature entraîne une accumulation au sein des organismes et, par conséquent, dans les chaînes trophiques, dont la chaîne alimentaire humaine. C'est un sujet de préoccupation majeur en raison des effets possibles sur la santé et l'environnement.

La problématique est double. D'une part, quels sont les effets sur les organismes ? Si au-delà de 10 micromètres, le risque que les particules de plastique pénètrent dans les cellules est faible, celles de taille inférieure à 10 micromètres sont susceptibles d'y entrer par divers mécanismes (phagocytose, endocytose...). D'autre part, ces particules aggravent-elles l'exposition aux substances qui composent les plastiques ? Rien ne permet d'éliminer cette possibilité. Le dioxyde de titane, par exemple, est très utilisé dans la fabrication

de plastiques pour sa pigmentation blanche et sa résistance. Or il se présente lui-même sous la forme de particules de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres dont diverses études suggèrent qu'elles pourraient perturber le fonctionnement des cellules. Quel effet a-t-il lorsqu'il est encore associé aux microplastiques ?

Ces questions sont largement débattues actuellement, à commencer par leur prérequis : quelle est notre exposition ? La réponse est loin d'être claire. Une abondante littérature existe sur la présence des microplastiques dans les aliments, s'appuyant sur un large éventail de méthodes pour isoler, compter et analyser ces particules dans les différents aliments, ce qui complique l'estimation. En 2020, en compilant les données de telles études, Juan Conesa et Maria Iñiguez, de l'université d'Alicante, en Espagne, ont ainsi évalué qu'un humain ingère en se nourrissant 22 à 37 milligrammes de microplastiques par an. Mais de leur côté, Kala Senathirajah, de l'université de Newcastle, en Australie, et ses collègues ont estimé, à partir de 59 publications mesurant la quantité de microplastiques



présents dans la nourriture, les boissons, l'eau et l'atmosphère, qu'une personne en ingère entre 0,1 et 5 grammes (l'équivalent d'une carte bancaire) par semaine. Et encore tout récemment, l'équipe d'Albert Koelmans, à l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, a estimé par modélisation qu'en moyenne, via l'air ou la nourriture, un adulte est exposé à 0,2 milligramme de microplastiques par an, soit bien moins que dans les deux autres études.

Quant aux nanoplastiques, encore peu d'études ont évalué leur présence dans la chaîne alimentaire humaine, probablement du fait de l'absence de méthodologies validées et standardisées.

J.-B. F.

pour autant, car ces matériaux se désagrègent plus facilement en microparticules.

La seconde piste pour limiter les risques des plastiques et de leurs composés est d'envisager de nouvelles méthodologies pour évaluer leurs effets en amont et de modifier en conséquence les réglementations sur les plastiques. Lorsque ces dernières, et en particulier celles sur les produits en contact avec les aliments, ont été mises en place dans les années 1970, on admettait généralement que les expositions chimiques de faible niveau, c'est-à-dire inférieures à la dose sans effet toxicologique établi, présentaient des risques négligeables pour les consommateurs. Toutefois, des études plus récentes ont montré que cette hypothèse n'est pas valide dans tous les cas : l'exposition à de faibles concentrations suffit parfois à perturber le système endocrinien et induire des effets néfastes sur la santé.

Par exemple, en recherchant une trentaine de molécules connues pour être des perturbateurs endocriniens ou suspectées de l'être (phtalates, bisphénol A, perfluorés...) dans les urines de la cohorte Selma, rassemblant plus de 1800 paires mère-enfant, nous avons établi, au sein d'une collaboration internationale, une corrélation entre l'exposition *in utero* à un mélange de 11 molécules et un retard de langage des enfants à 3 ans. Nous avons aussi validé chez la grenouille et le poisson-zèbre que ce mélange perturbe plusieurs axes hormonaux, notamment les hormones thyroïdiennes et de la reproduction. Or, *a priori* (le doute est permis concernant les perfluorés), les substances du mélange étaient présentes à des doses inférieures aux doses réglementaires dans l'environnement des femmes étudiées. Surtout, cette étude montre que l'évaluation du risque actuellement fondée sur une évaluation individuelle

des molécules n'est pas du tout adaptée à la réalité de l'exposition aux mélanges.

Il est donc légitime de s'interroger sur la pertinence de la réglementation actuelle et des méthodes employées. Pour la grande majorité des plastiques, cosmétiques, pesticides, seules les molécules majoritaires entrant dans leurs formulations sont testées. Pour les plastiques, la plupart du temps, seul le monomère est mesuré (styrène dans le polystyrène, le propylène dans le polypropylène, etc.).

UNE RÉGLEMENTATION INAPPROPRIÉE

Le règlement européen (CE n°1935/2004) préconise que les substances cédées par les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires ne doivent pas entraîner de modifications inacceptables de la composition des denrées. Les bonnes pratiques de fabrication permettent de produire des matériaux en matière plastique qui ne cèdent pas plus de 10 milligrammes de substances par décimètre carré de surface du matériau. Cette limite de migration globale correspond, pour un emballage cubique contenant 1 kilogramme de denrées alimentaires, à une migration de 60 milligrammes.

Or ce règlement et les normes sont fondées sur les niveaux de seuil des molécules simples utilisées pour fabriquer les contenants et ne prennent en considération ni l'âge d'exposition ni les effets à faibles doses des molécules, ni le fait que nous sommes exposés à un mélange de molécules. Ainsi, des substances interdites pour certains usages peuvent être autorisées dans les plastiques en contact avec les aliments si leur migration dans ces derniers est inférieure à la limite de détection de 10 microgrammes par kilogramme d'aliments, et s'ils ne sont pas

COMMENT LIMITER NOTRE EXPOSITION AUX PLASTIQUES OU À LEURS ADDITIFS

- > Ne pas réchauffer les aliments au four à microondes dans des barquettes ou poches en plastique. Les transvaser dans des récipients en verre.
- > Ne pas réutiliser des bouteilles plastiques pour le stockage de l'eau.
- > Limiter le stockage des aliments dans des contenants en plastique, même à froid.
- > Limiter l'usage de film alimentaire, surtout lorsqu'il est en contact direct avec les aliments. Préférer les films en tissu ciré.
- > Manger dans des contenants inertes.
- > Aérer.

QUELLES BARQUETTES POUR LA CANTINE DES ÉCOLES ?

Adoptée en novembre 2018, la loi Egalim interdira dès 2025 l'usage de contenants en plastique dans la restauration collective accueillant des enfants. Les contenants en acier inoxydable et en verre utilisés historiquement étant lourds et leur système de nettoyage encombrant, de nombreuses communes ont orienté leur choix vers des contenants en bioplastique à base de cellulose, légers et jetables, ou pourraient le faire. Or aucune norme n'oblige à évaluer les effets de la formulation complète de ces barquettes alimentaires sur la santé. Cela est d'autant plus vrai pour les composés néoformés lors du réchauffage des aliments. De plus, si les effets biologiques, dont la

perturbation hormonale, ont été parfois évalués, ils n'étaient effectués que sur des fragments de barquettes dissous et sur des modèles cellulaires.

Avec des collègues du CNRS, du Muséum national d'histoire naturelle, de l'Inserm, de l'Inrae et deux partenaires industriels, le Laboratoire national de métrologie et le laboratoire WatchFrog, nous avons lancé le projet *PoLySafe*, dont l'objet est d'évaluer l'inertie de ces contenants alimentaires dans leur globalité. Il s'agira de mettre des contenants alimentaires en polypropylène, cellulose, acier inoxydable et en verre en présence de substances simulant deux types d'aliments (des solutions acide ou lipidique) avec un temps de contact

déterminé et à une température représentative des conditions réelles d'utilisation. Nous obtiendrons ainsi des extraits dans lesquels des dizaines (voire des centaines ?) de substances auront diffusé. Nous testerons ces extraits sur des cellules humaines et des modèles aquatiques (xénope, poisson-zèbre...) afin d'évaluer l'activité biologique de ces mélanges de molécules, ce qui nous permettra de mesurer les risques sur le métabolisme, les perturbations thyroïdiennes, œstrogéniques et androgéniques (hormones sexuelles féminines et masculines, respectivement). Nous obtiendrons nos premiers résultats début 2022.

J.-B. F.